

# Малогабаритные датчики углового положения на основе микросхемы однокристалльного магнитного энкодера

Георгий Прокофьев, Вениамин Стахин, Роман Германов (г. Зеленоград)

Распространёнными задачами при построении современных систем управления двигателями, подвижными узлами и механизмами является измерение углового положения вала с установкой датчика на его торце. Такая конструкция позволяет минимизировать размеры при использовании однокристалльных энкодеров. В статье приведён обзор разработанной микросхемы однокристалльного энкодера, особенности и примеры применения энкодера для создания датчиков положения, описано влияние внешних магнитных полей на его характеристики на примере ротора вентильного двигателя.

## ВВЕДЕНИЕ

Использование магнитного принципа определения положения является активно развивающимся направлением создания датчиков положения. Магнитный принцип, благодаря относительной простоте конструкции, позволяет обеспечить высокую надёжность и широкий рабочий диапазон температур от  $-60$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, использование магнитного поля для детектирования положения позволяет расширить области применения и использовать данный тип датчиков в условиях повышенной загрязнённости среды и повышенной влажности воздуха, что является бесспорным преимуществом по сравнению с оптическими датчиками.

Датчики положения на магнитном принципе основаны на детектировании пространственного распре-

ления магнитного поля постоянно магнита, связанного с положением измеряемого объекта. Одной из распространённых задач является измерение углового положения вала с возможностью установки датчика положения на торце вала. Для решения таких задач АО «ЗНТЦ» была спроектирована микросхема однокристалльного магнитного энкодера углового положения ENC\_ASIC2 [1].

## ПРИНЦИП РАБОТЫ И ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ТОРЦЕВЫХ ДАТЧИКОВ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Упрощённая конструкция магнитной системы торцевого датчика углового положения ротора показана на рисунке 1. На валу ротора закреплён диаметрально намагниченный постоянный магнит, под магнитом размещается

микросхема однокристалльного энкодера. Магнит создаёт магнитное поле с двумя экстремумами, трёхмерное распределение магнитного поля показано на рисунке 2. Вдоль радиуса магнита z-компонента индукции магнитного поля описывается синусоидой, фаза которой однозначно определяет положение в пределах одного оборота. Таким образом, измерение z-компоненты индукции магнитного поля позволяет определить угловое положение вала.

Важным параметром является расстояние между магнитом и микросхемой энкодера, определяющее значение индукции магнитного поля. Было проведено моделирование значения величины нормальной компоненты индукции магнитного поля по окружности радиусом  $1,1$  мм от центра, совпадающего с центром магнита и находящегося на определённом расстоянии от его поверхности. На рисунке 3 приведены зависимости максимума z-компоненты (нормальной компоненты) индукции магнитного поля на радиусе  $1,1$  мм от расстояния для разных конфигураций магнита, полученные методом численного моделирования трёхмерной модели магнита. Из рисунка 3 видно, что индукция магнитного поля магнита NdFeB составляет от  $20$  до  $130$  мТл. При этом, чем шире магнит, тем индукция магнитного поля меньше и слабее зависит от расстояния.

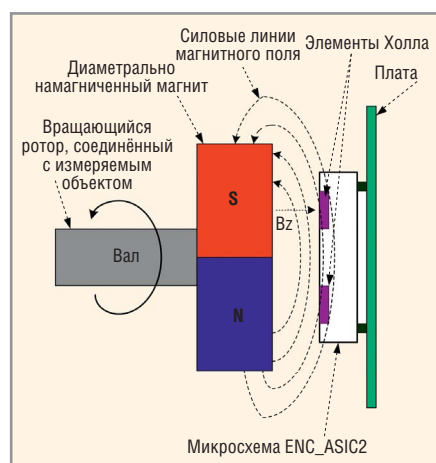


Рис. 1. Упрощённая конструкция торцевого датчика положения,  $B_z$ -z-компонента индукции магнитного поля

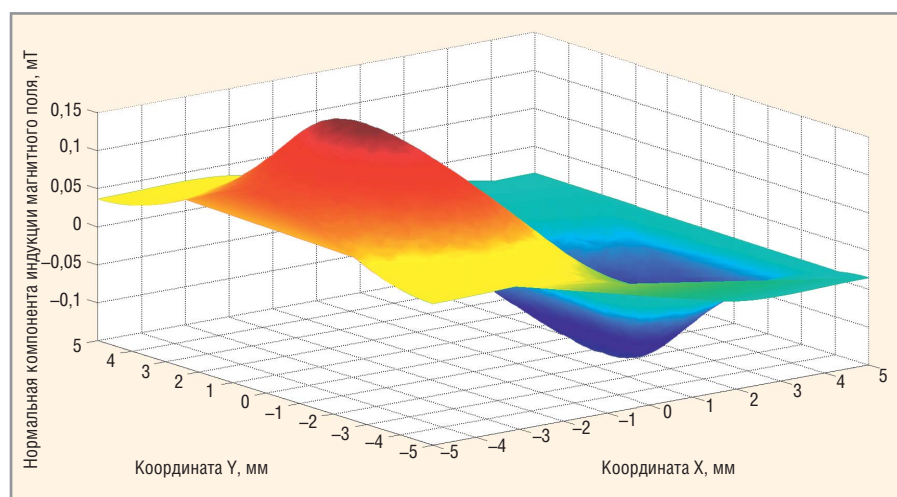
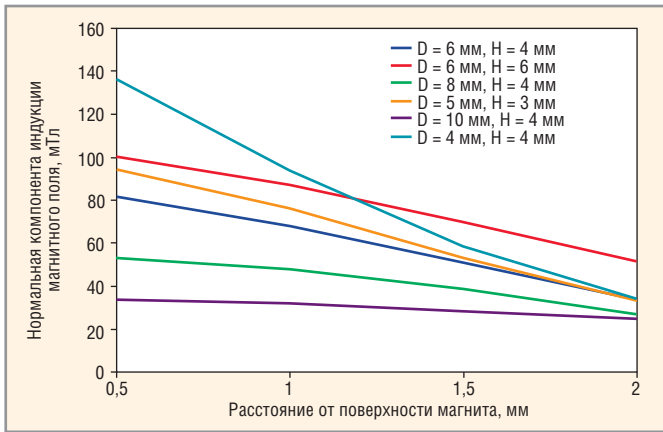


Рис. 2. Трёхмерное распределение магнитного поля цилиндрического диаметрально намагниченного магнита  $D6 \times 4$  мм NdFeB при удалении  $1$  мм



**Рис. 3.** Зависимость максимума z-компоненты индукции магнитного поля от расстояния до поверхности магнита в точке на радиусе 1,1 мм от центра магнита, остаточная намагниченность магнита  $B_r = 1,1$  Тл (NdFeB)

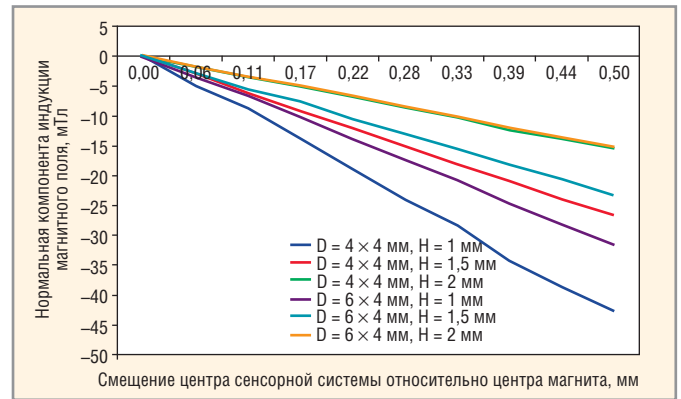
В реальных системах возможно смещение между центрами сенсорной системы микросхемы энкодера и магнита. Численным моделированием трёхмерной модели магнита было показано, что данное смещение приводит к появлению постоянной составляющей магнитного поля над элементами сенсорной системы микросхемы. Были получены зависимости данного магнитного смещения от рассовмещения цен-

тров для двух конструкций магнитов  $D_6 \times 4$  мм и  $D_4 \times 4$  мм (диаметр  $\times$  высота) и трёх значений расстояния между микросхемой и магнитом (см. рис. 4).

Зависимости на рисунках 3 и 4 показывают важность выбора магнита. Оптимальным магнитом для разработанной микросхемы энкодера является магнит  $D_6 \times 4$  мм, оптимальный как по размерам и по амплитуде магнитного поля, так и по магнитному смещению,

т.е. толерантности к рассовмещению центров сенсорной системы и магнита.

В качестве материала магнита рекомендуется использовать мощные редкоземельные магниты из материалов NdFeB [2] и SmCo [3]. Оба материала обладают высокой остаточной намагниченностью и коэрцитивной силой и обеспечивают диапазон рабочих температур до  $180^\circ\text{C}$  (отдельные марки до  $200\text{--}240^\circ\text{C}$ ) для материала NdFeB и свыше  $300^\circ\text{C}$  для



**Рис. 4.** Зависимость нормальной компоненты индукции магнитного поля от рассогласования и от расстояния до поверхности магнита в точке на радиусе 1,1 мм от центра магнита, остаточная намагниченность магнита  $B_r = 1,1$  Тл (NdFeB)



**АРБЕЛОС**  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

**РОССИЙСКИЙ РАЗРАБОТЧИК  
И ПРОИЗВОДИТЕЛЬ**

- Разработка герметичных DC/DC-преобразователей для ответственных применений
- Разработка и производство мощных источников питания для авиационной аппаратуры
- Разработка заказных силовых и ВЧ/СВЧ-модулей
- Производство дискретных силовых компонентов в керамических корпусах
- Разработка и проведение испытаний изделий и компонентов силовой электроники

**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИЛЕР НПП «АРБЕЛОС»**

**ProCHIP**  
POWERED BY ProSOFT

Активный компонент вашего бизнеса

ТЕЛ.: (495) 232-2522 / ФАКС: (495) 234-0640 / INFO@PROCHIP.RU / WWW.PROCHIP.RU

Реклама

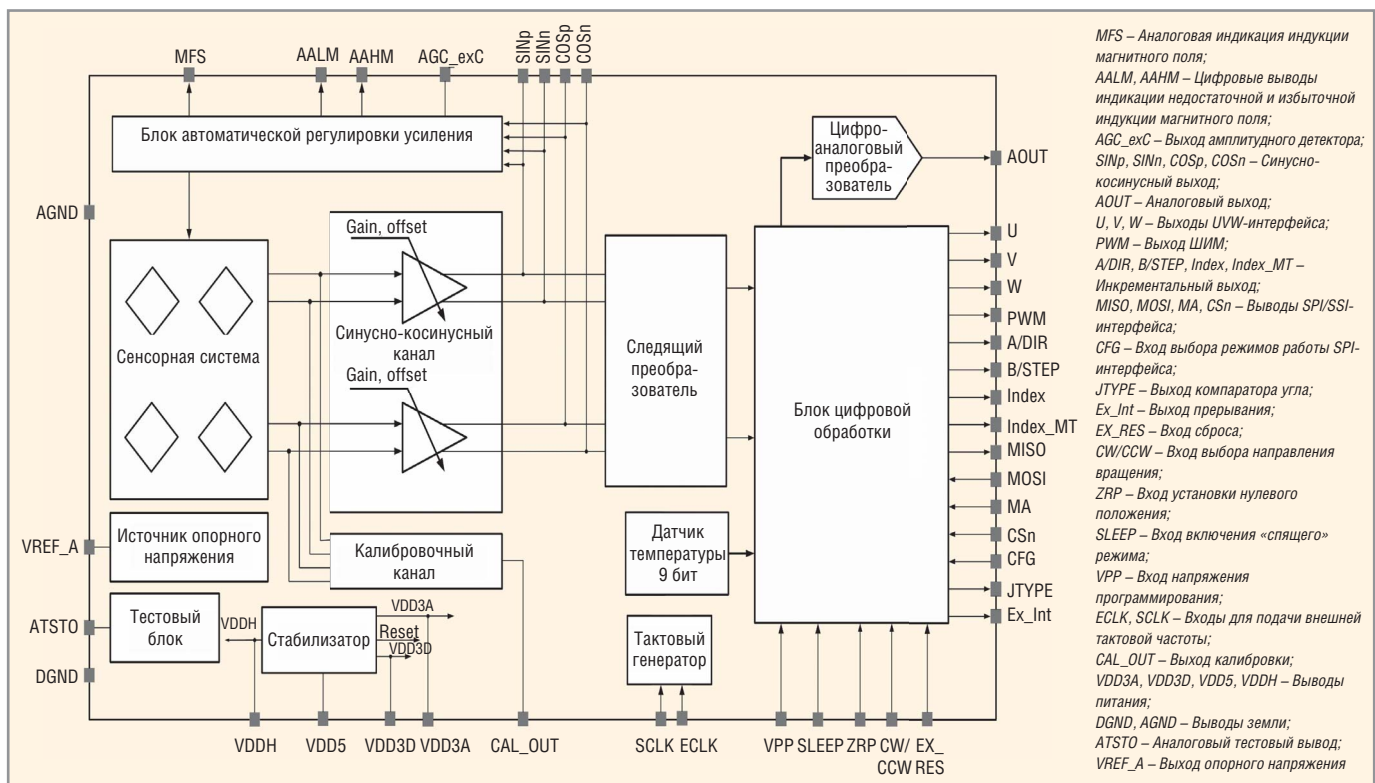


Рис. 5. Структурная схема микросхемы ENC\_ASIC2

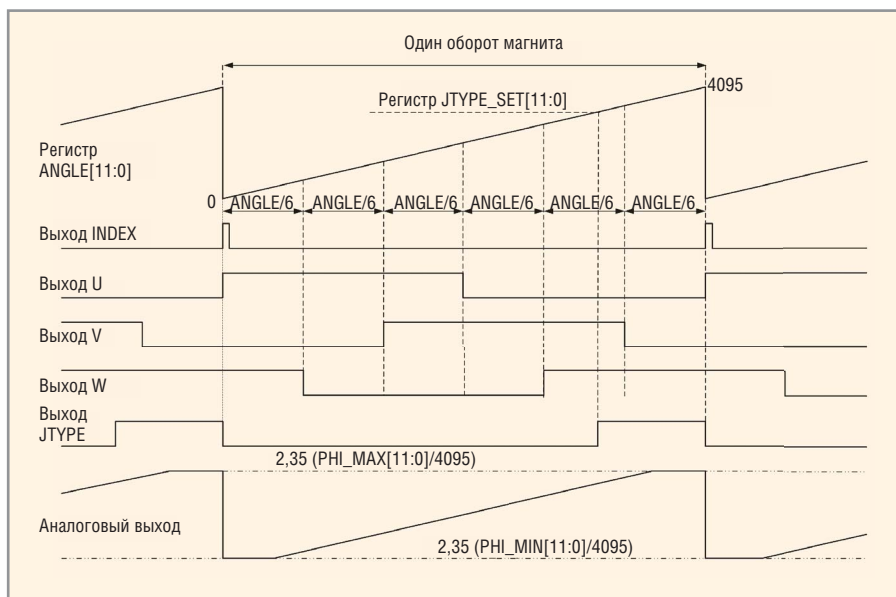


Рис. 6. Диаграмма работы микросхемы ENC\_ASIC2, где PHI\_MIN[11:0], PHI\_MAX[11:0], JTYPE\_SET[11:0], ANGLE[11:0] – регистры настройки микросхемы

материала SmCo. Для изделий специального назначения, работающих в условиях воздействия высоких температур, коррозии и требующих очень длительный срок службы, рекомендуется использовать магниты из материала SmCo.

Необходимо отметить, что узел крепления магнита к валу должен быть выполнен из ферромагнитного материала для исключения искажения в распределении магнитного поля из-за замыкания силовых линий в ферромагнетике [4].

### МИКРОСХЕМА ОДНОКРИСТАЛЛЬНОГО МАГНИТНОГО ЭНКОДЕРА

Структурная схема разработанной микросхемы магнитного энкодера приведена на рисунке 5. Микросхема содержит сенсорную систему на основе интегральных элементов Холла, расположенных по окружности кристалла. Сигналы с сенсорной системы обрабатываются таким образом, что формируется синусно-косинусный сигнал, фаза которого пропорциональна угловому

положению магнита. Спроектированная сенсорная система не чувствительна к постоянному магнитному смещению в пределах  $\pm 15... \pm 30$  мТл (в зависимости от амплитуды полезной составляющей магнитного поля). Кроме того, микросхема имеет канал индикации CAL\_OUT, амплитуда на выходе которого пропорциональна механическому рассовмещению центров магнита и сенсорной системы. Для поддержания постоянной амплитуды сигнала на выходе сенсорной системы микросхема включает блок автоматической регулировки усиления, при этом индикация силы магнитного поля доступна на выходе MFS в аналоговом виде и через SPI в цифровом виде.

Для преобразования синусно-косинусного сигнала в код положения используется быстродействующий следящий преобразователь оригинальной конструкции. Следящий преобразователь преобразует сигнал в 12-разрядный код положения с номинальным быстродействием 250 нс, что соответствует частоте вращения магнита 60 000 об/мин. По результатам измерений максимальная скорость преобразования может быть увеличена до 150 нс путём перестройки частоты тактового генератора микросхемы.

Сигнал со следящего преобразователя после дополнительной обработки поступает на выход микросхемы. Для передачи абсолютного кода поло-

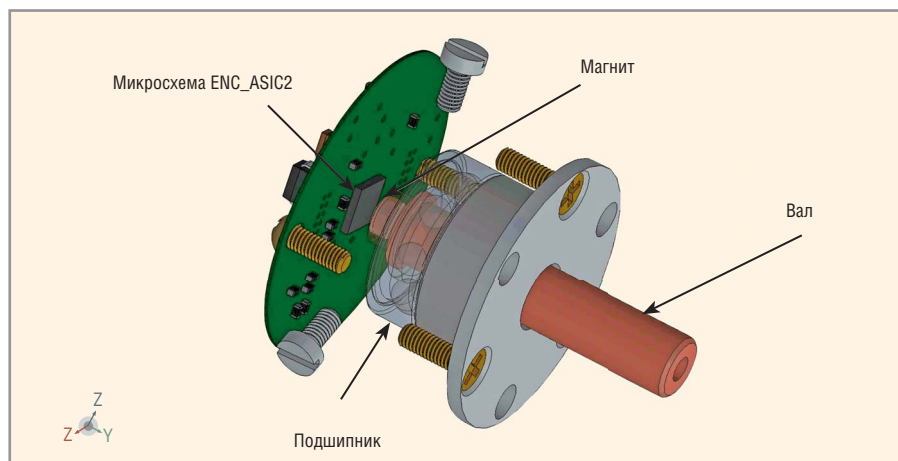


Рис. 7. Конструкция датчика углового положения на основе ENC\_ASIC2

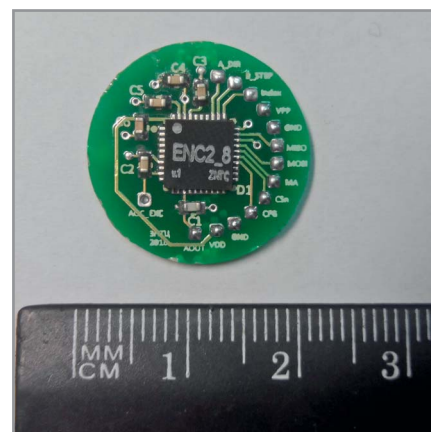


Рис. 8. Конструкция малогабаритного датчика углового положения на основе ENC\_ASIC2

жения используется интерфейс SPI/SSI. Микросхема также поддерживает инкрементальный интерфейс, ШИМ, линейный аналоговый, трёхфазный UVW-интерфейс и сигнал компаратора угла. Также микросхема включает счётчик оборотов, позволяющий формировать многооборотный код положения с программируемым количеством оборотов до 1024 и выдачей отдельного многооборотного сигнала опорной метки инкрементального интерфейса. Диаграмма работы микросхемы показана на рисунке 6.

Микросхема позволяет смещать электрическое угловое положение относительно механического на любой угол в пределах одного оборота путём записи числового значения смещения в специальный регистр. Кроме того, текущее положение может быть установлено в качестве нулевого по фронту логического сигнала с входа ZRP. Для удобства использования микросхема имеет отдельный логический вход установки электрического направления вращения CW\_CCW.

Микросхема включает интегрированный температурный сенсор разрешением 8 бит, показания которого могут быть считаны через SPI-интерфейс. Температурный сенсор может применяться для диагностики температурного режима датчика и выдачи команды аварии при выходе температуры за пределы рабочего диапазона.

Основные параметры микросхемы приведены в таблице.

### ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Базовая конструкция датчика углового положения показана на рисунке 7, части корпуса скрыты. Представлен-

ная конструкция применяется в энкодерах ЭУПМ-360-М1 [5], выпускаемых АО «ЗНТЦ» и применяемых для управления рулями малого речного транспорта.

Важной особенностью конструкции представленного магнитного энкодера является возможность отделить плату электроники с микросхемой энкодера от вала с магнитом с помощью немагнитной (например, алюминиевой) перегородки. Это обеспечивает высокую степень защиты электроники от воздействия окружающей среды и позволяет создавать полностью герметичные энкодеры углового положения.

Однокристальное решение с минимумом навесных компонент позволяет создавать датчики углового положения с очень малыми габаритами. На рисунке 8 показана конструкция платы энкодера с минимальными размерами. Диаметр платы составляет всего 20 мм. Данная плата энкодера питается от напряжения  $5 \pm 0,5$  В и обеспечивает выдачу угловых данных по интерфейсу SPI, аналоговому выходу и инкрементальному интерфейсу.

#### Основные параметры микросхемы энкодера ENC\_ASIC2

Параметр	Значение
Напряжение питания, В	$5/3,3 \pm 10\%$
Разрешение преобразования, бит (град)	12 (0,09)
Абсолютная ошибка преобразования, град	$\pm 0,35$
Время преобразования, нс	250 (150*)
Скорость слежения, об/мин	> 60 000
Ток потребления, мА	30
Ток потребления в режиме синусно-косинусного сенсора, мА	15
Максимальная частота интерфейса SPI/SSI, не менее, МГц	4
Разрешение встроенного температурного сенсора, °C	1,5
Счётчик оборотов	1–1024
Диапазон рабочих температур, °C	$-60 \dots 125(150^{**})$
Диапазон индукции магнитного поля, мТл	20–80
Постоянное смещение магнитного поля, мТл	$\pm 15$

Примечания:

\* Значение ошибки преобразования не гарантируется.

\*\* Кратковременно.



Рис. 9. Применение ENC\_ASIC2 для управления электродвигателем по датчику положения ротора

этого влияния. Данная задача сводится к оценке величины паразитного магнитного поля магнитов ротора в месте расположения платы с микросхемой энкодера. Для такой оценки была создана трёхмерная модель, включающая четыре магнита NdFeB размером  $5 \times 5 \times 8$  мм, размещённых на окружности радиусом 10 мм. Оценивалось магнитное поле на расстоянии 5 и 10 мм от магнитов (такое расстояние достижимо при интеграции энкодера непосредственно в двигатель) на оси окружности вдоль радиуса, соответствующего расположению чувствительных элементов сенсорной системы микросхемы энкодера. Результаты моделирования показали, что максимум паразитной индукции магнитного поля составляет  $\pm 800$  мкТл для 5 мм и  $\pm 53$  мкТл для 10 мм. Таким образом, при условии использования постоянного магнита  $6 \times 4$  мм в рабочем зазоре магнитное поле составляет порядка 50 мТл и ошибка преобразования, вызванная полем магнитов ротора, будет составлять 1,6% для удаления сенсора 5 мм и 0,11% для удаления сенсора 10 мм. Полученные данные говорят о необходимости экранировки микросхемы энкодера от поля магнитов ротора для получения приемлемых значений ошибки преобразования энкодера. В качестве экрана могут использоваться материалы с высокой магнитной проницаемостью, в том числе сталь. Разработанная модель была дополнена экраном из стали толщиной 0,5 мм с отверстием под вал в центре, находящимся на расстоянии 2 мм от краёв магнитов (см. рис. 10).

По результатам моделирования системы с экраном максимум индукции магнитного поля снизился до  $\pm 24$  мкТл для удаления 5 мм и  $\pm 33$  мкТл

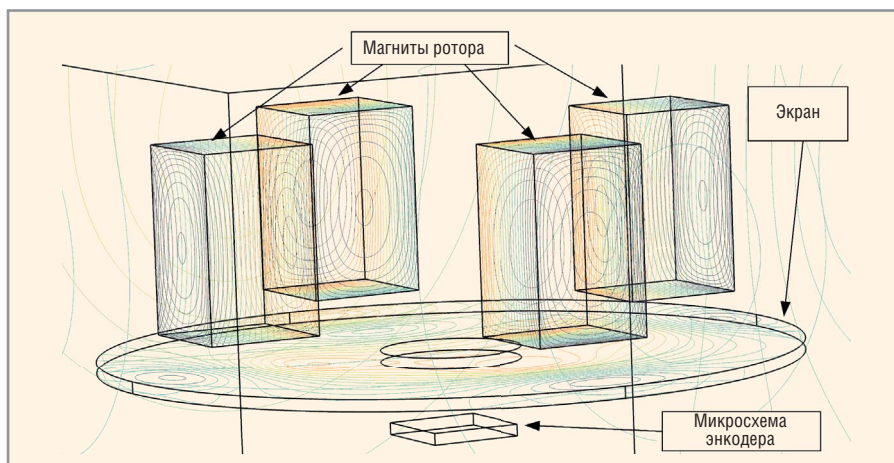


Рис. 10. Модель для оценки влияния паразитной индукции магнитного поля для магнитов ротора двигателя

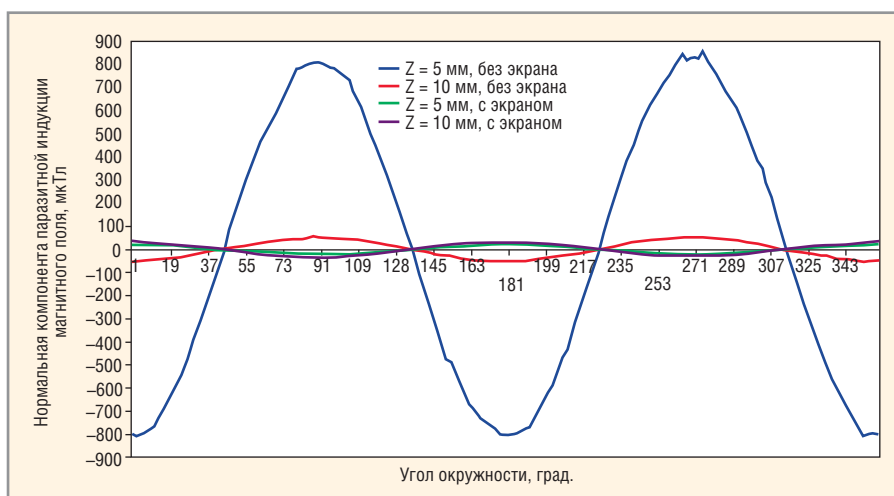


Рис. 11. Нормальная компонента паразитной индукции магнитного поля для модели ротора без экрана и с экраном вдоль окружности сенсорной системы микросхемы энкодера

для 10 мм. Таким образом, данный простой экран позволяет снизить ошибку преобразования до 0,048% для 5 мм и 0,066% для 10 мм. Моделирование показывает, что простой экран из магнитомягкого материала позволяет снизить уровень паразитной индукции магнитного поля до уровня, необходимого для получения ошибки на уровне 11 разрядов. Графики зависимости нормальной компоненты паразитной индукции магнитного поля модели без экрана и с экраном приведены на рисунке 11.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная микросхема однокристалльного энкодера ENC\_ASIC2 позволяет создавать малогабаритные быстродействующие датчики углового положения с разрешением 4096 отсчётов на оборот. Проведённый анализ показал необходимость экранировки для получения прецизионных характеристик при интеграции микросхемы

внутри двигателя на постоянных магнитах. Полученные зависимости параметров магнитной системы позволят упростить создание датчиков положения на основе микросхемы ENC\_ASIC2.

### ЛИТЕРАТУРА

- ENC\_ASIC2. БИС однокристалльного магнитного энкодера положения. Предварительная спецификация. АО «ЗНТЦ». 2015. [www.zntc.ru/capabilities/design-center/products/2-encoder-position.php](http://www.zntc.ru/capabilities/design-center/products/2-encoder-position.php).
- ГОСТ Р 52956-2008. Материалы магнитотвёрдые спечённые на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры.
- ГОСТ 21559-76. Материалы магнитотвёрдые спечённые.
- Щерба А. Магнитные энкодеры производства Austriamicrosystems. Позиционирование магнита над корпусом микросхемы. Компоненты и технологии. 2008. №7.
- Энкодер углового положения магнитный ЭУПМ-360-M1. Спецификация. АО «ЗНТЦ». 2014. [www.zntc.ru/research/sensors](http://www.zntc.ru/research/sensors).

# interlight

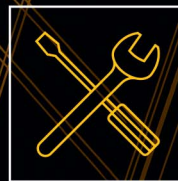
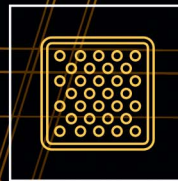
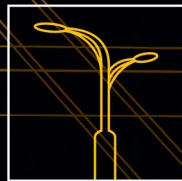
MOSCOW

powered by light+building

Международная выставка декоративного и технического освещения, электротехники и автоматизации зданий

**8 — 11 ноября 2016**

ЦВК «Экспоцентр», Москва



Получите бесплатный билет на сайте  
[www.interlight-moscow.ru](http://www.interlight-moscow.ru)



messe frankfurt